

# LA ARMADA Y LA METROLOGÍA DE TIEMPO: EL CAMINO HACIA UNA NUEVA REDEFINICIÓN DEL SEGUNDO

Héctor ESTEBAN PINILLOS

Héctor ÁLVAREZ MARTÍNEZ



En 1967, en la 13.<sup>a</sup> Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) de París, se definía el segundo del Sistema Internacional de unidades (SI) como «la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133». Esto, que *a priori* puede pasar desapercibido, pone de relevancia que en poco más de 50 años hemos pasado de mirar hacia el cielo y observar los astros, a estudiar el interior de la materia y explorar los átomos en la búsqueda de una referencia de tiempo acorde a nuestras necesidades; eso sí, ahora, de una forma mucho menos intuitiva.

A pesar de que los actuales patrones de Tiempo y Frecuencia (TF) alcanzan unos niveles de exactitud (1) y estabilidad (2) más que remarcables (como aclaración, considérese la analogía de la diana representada en la figura 1), el gran incremento en la demanda de precisión para la medición del tiempo y de la frecuencia, generado por el vertiginoso progreso tecnológico en los campos de la información y de la navegación, obliga al diseño, desarrollo y construcción de relojes atómicos cada vez más exactos y precisos.

---

(1) Cercanía de la medida al valor verdadero.

(2) Variabilidad de la medida en torno al valor medio medido, también expresada como precisión.



Figura 1. Analogía de la diana relativa a los conceptos de exactitud y estabilidad.

En consecuencia, varios países en todo el mundo están llevando a cabo investigaciones científicas relacionadas con relojes atómicos que operan en el rango óptico del espectro electromagnético, con el objetivo claro de seguir innovando para lograr un rendimiento acorde a los requerimientos actuales y aquellos futuros que pudieran plantearse, además de ayudarnos a probar e inferir algunas de las teorías físicas que nos gobiernan. El uso de frecuencias ópticas, en lugar de microondas, permite que el reloj opere con una unidad mucho más pequeña de tiempo, proporcionando una mayor resolución, lo que se traduce en una mejora tanto en estabilidad como en exactitud de al menos dos órdenes de magnitud (cien veces mejor). Pero, ¿es necesaria una nueva redefinición del segundo SI? ¿Y está la Armada, y por tanto España, preparada para ello?

## Desarrollo histórico

No cabe duda de que el tiempo (y su magnitud derivada, la frecuencia) constituye una de las unidades físicas más cotidianas, junto con la longitud y la masa. Desde tiempos remotos el hombre ha puesto empeño en su determinación de la manera más precisa con los instrumentos disponibles a su alcance, los cuales necesitaban de una referencia. La búsqueda en la naturaleza de fenómenos físicos periódicos que sirviesen para referenciar esos instrumentos de medida —relojes en el caso que nos atañe— fue centrada desde el antiguo Egipto en los astros. Las observaciones celestes eran suficientes para la agricultura y la industria básica del momento. Los primeros relojes solares fueron evolucionando a través de las clepsidras (especialmente útiles durante la noche) hasta la aparición en la Edad Media de los relojes de arena que, al no verse

afectados por el movimiento en la mar, no tardaron en hacerse populares en los buques (3) y pasaron a ser una herramienta imprescindible para el marino de la época. Al final de esta era comienza el desarrollo de los relojes mecánicos; pero sus prestaciones no llegan a ser notables hasta el siglo XVII, momento en el que las principales potencias europeas comienzan su lucha por la hegemonía de los nuevos territorios conquistados de ultramar y el comercio marítimo con estos. El problema era bien conocido, se necesitaba conocer el tiempo a bordo para poder determinar con suficiente precisión la longitud y, por tanto, practicar una navegación más segura y eficiente. Muy a menudo, pequeñas variaciones en tiempo, incluso de unos pocos segundos (4), significaban la diferencia entre la vida y la muerte; como así le ocurrió a sir Cloudesley Shovell en 1707, en una zona de bajos próxima a las islas Sorlingas al suroeste de Inglaterra, en la que cuatro buques de su flota acabaron hundidos, pereciendo casi 2.000 hombres. Todo ello supuso un gran agujonazo en la moral británica, que no tardó en reaccionar impulsando la búsqueda de una solución definitiva, que finalmente se encontró —a pesar de las reticencias de los astrónomos de la época, que rechazaban todo aquello que no estuviese basado en el firmamento y sus cuerpos celestes— con el desarrollo de un artefacto mecánico, el cronómetro marino (5). Es entonces cuando comienzan a construirse los primeros observatorios astronómicos, como el de Greenwich, el de París y el de Cádiz. El motivo era doble: dotar a sus marineros de conocimientos en Astronomía a la vez que se establecían referencias de tiempo en tierra que permitían a los buques cercanos calibrar sus cronómetros marinos. Desde entonces, el tiempo siempre ha estado ligado a los astrónomos, que proveían de una referencia —la propia rotación de la Tierra—, y a los maestros relojeros en su afán de materializarla, perfeccionando así sus artefactos de medida.

Uno de los elementos clave de estos observatorios eran los relojes de péndulo de precisión, también conocidos como «guardatiempos», al ser sistemas capaces de proporcionar la hora entre observaciones. Su uso se generalizó con el paso de los años, y a principios del siglo XX aparecieron los péndulos eléctricos, caracterizados por funcionar en un ambiente estanco a presión constante. Así, en 1920 se recibe en San Fernando el primer péndulo de estas características, de la firma Clemens Riefler, que fue instalado en una sala con las paredes forradas en corcho para aislarlo de las variaciones de temperatura. Estos relojes acumulaban

---

(3) El uso del reloj de arena, junto a la corredera, propició el cálculo de la velocidad de una embarcación y la navegación por estima.

(4) Un error de cuatro segundos en tiempo puede acarrear una inexactitud en el cálculo de la longitud de hasta una milla náutica.

(5) Destacar a John Harrison y su mítico H-4, realizado en Inglaterra en 1759. Este reloj, similar a uno de bolsillo de grandes dimensiones, se retrasó tan solo cinco segundos después de una navegación de ochenta días, lo que a la postre le hizo gran merecedor del premio de 20.000 libras establecido por el Decreto de la Longitud de 1714.



Figura 2. Péndulo Shortt a presión y temperatura constante (1935).

errores de unos pocos milisegundos a lo largo del día, lo que significó un sustancial progreso frente a la variación de una décima de segundo de los péndulos tradicionales. El último, y posiblemente el mejor reloj de estas características, fue desarrollado en Londres por William Shortt. Buena fe de ello dan los dos sistemas instalados en el Observatorio durante los años 1935 y 1952, actualmente expuestos al público, como el que aparece en la figura 2.

Gracias a este tipo de relojes de péndulo de gran precisión se pudo constatar la irregularidad de la rotación terrestre que, estudiada desde el punto de vista de un reloj, también acumula variaciones diarias desde uno a unos pocos milisegundos. Cabe reseñar que este hecho no llamó especialmente la atención de los astrónomos de la época, que ya barruntaban desde hacía siglos esta posibilidad, puesta de manifiesto por el propio Newton al explicar la aparente aceleración orbital de la Luna como una deceleración del ritmo de rotación terrestre.

Poco tiempo después, y en gran medida gracias a su desarrollo durante la Segunda Guerra Mundial, aparecen los primeros relojes de cuarzo, capaces de conservar el tiempo por debajo de la milésima de segundo. No obstante, debido a un comportamiento irregular de su marcha relacionado con cambios en su estructura interna cristalina, fueron considerados inadecuados para la obtención de un sincronismo absoluto y hubo que volver la vista hacia la «oscilación interna» de la materia. Con ello no

se quiere infravalorar este tipo de relojes, que resultan tan frecuentes como necesarios y un elemento clave en la mayor parte de los dispositivos electrónicos, como ocurre en los patrones atómicos, donde son utilizados como fuente de frecuencia para la transición atómica.

## Establecimiento de una referencia de tiempo

La definición del tiempo comienza a cobrar importancia a finales del siglo XVIII con la mejora en la determinación de su exactitud y la evolución de las actividades económicas a nivel local. Como por aquella época no existía ningún tipo de referencia horaria, con la llegada del ferrocarril en el siglo XIX se hacen evidentes los problemas de sincronización de los relojes entre zonas geográficas distintas, motivo por el que empiezan a establecerse las horas locales medias de las ciudades más representativas del paso del ferrocarril. En 1884, en Washington D. C. tiene lugar la Conferencia Internacional del Meridiano, donde se decide que el meridiano único de referencia (6), como origen de la longitud geográfica, sea el que pasa por el Observatorio de Greenwich.

Coincidiendo casi en el tiempo, en 1875 tuvo lugar la Convención del Metro en París con motivo de la adopción del patrón de longitud, una cantidad física tan básica como el tiempo. Además se crean el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) bajo el órgano de decisión de la CGPM, y la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), encargada de dirigir las diferentes actividades metrológicas y, fundamentalmente, elaborar en la actualidad la escala de Tiempo Atómico Internacional (TAI) y la escala de referencia internacional de Tiempo Universal Coordinado (UTC) a partir de la información de los más de 400 relojes atómicos distribuidos en alrededor de 80 institutos metrológicos repartidos por todo el mundo.

En 1960, durante la 11.<sup>a</sup> CGPM, se crea el SI, en el que quedan definidas seis de las actuales unidades básicas, a las que se suma posteriormente el mol (7) (1971). Resulta curioso que, si bien existía una definición aceptada de la unidad de tiempo —el segundo— igual a la fracción de  $1/86400$  de un día, no es hasta 1956 y la aparición del Tiempo de Efemérides (TE) cuando se aprueba su primera definición oficial durante la 11.<sup>a</sup> CGPM, basada en la fracción no ya de un día, sino de los segundos acumulados en un año, por lo que a la postre resultó, además de inaccesible, difícilmente entendible, excepto para los astrónomos.

Ello, unido a las fluctuaciones de la rotación de la Tierra y a las recientes investigaciones en la física atómica del momento y, en particular, a la espectroscopia de microondas, desembocó en la invención del primer reloj atómico de cesio (Cs). Así, en 1955, se demuestra por primera vez la medición del tiempo respecto de una referencia atómica en lugar de astronómica. Tan solo ocho años después, en la 13.<sup>a</sup> CGPM de 1967, se redefine el segundo SI en

---

(6) En España no fue hasta 1901 (1922 en las islas Canarias) cuando finalmente se establece la hora oficial española de acuerdo con el meridiano de Greenwich, y en 1907 cuando este se adopta como primer meridiano para usos navales.

(7) Las siete unidades básicas del SI son el metro (m), el segundo (s), la masa (kg), la temperatura (K), la corriente (A), la cantidad de sustancia (mol) y la candela (cd). De ellas se obtienen las 27 unidades derivadas, entre las que se encuentra la frecuencia (Hz).

términos de una transición atómica del  $^{133}\text{Cs}$ , que permanece vigente en la actualidad. Esto tuvo como consecuencia la creación del Tiempo Atómico Internacional (TAI) que, a grandes rasgos, viene a ser una escala de tiempo que da continuidad a los segundos SI generados por los diferentes relojes atómicos disponibles (14.<sup>a</sup> CGPM de 1971). Un año después, en la recién creada Sección de Hora del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) (8), comienzan a funcionar sus dos primeros relojes atómicos de haz de Cesio Oscillatom, puestos en hora en el Observatorio de Neuchatel (Suiza) y transportados en funcionamiento a San Fernando.

### Átomos para medir el tiempo

Los átomos tienen niveles de energía cuantificados, de ma-nera que entre cada

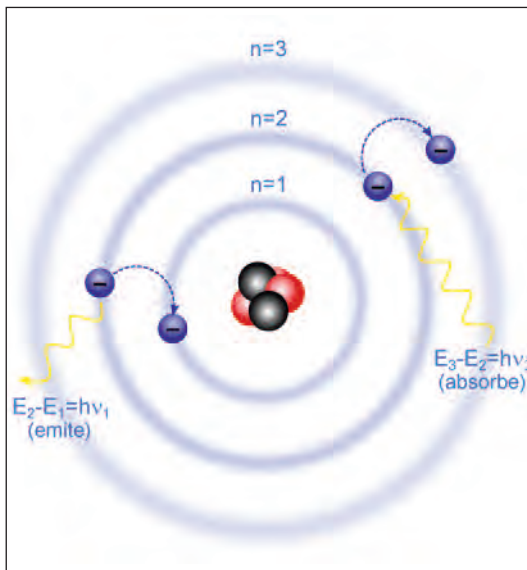


Figura 3. Principio de la absorción y la emisión atómica.

par de estos niveles (E) existe una frecuencia ( $\nu$ ), asociada a través de la constante de Planck (h), según la relación:  $h\nu = E_{i+1} - E_i$ , con-forme se muestra en la figura 3, donde el electrón absorbe (emite) luz en forma de pa-quetes discretos de energía llamados fotones para poder pasar a un nivel superior (inferior). La idea fundamental es que estas frecuencias atómicas son perfectamente estables y universales. La observación experi-mental soporta esta idea y nos permite considerarlas como pa-trones de frecuencia perfectos que nos proporciona la propia naturaleza.

El acceso a estas fre-cuencias atómicas y la trans-ferencia de sus cualidades a señales físicas que puedan ser usadas en el mundo macroscópico en que vivimos requiere de dispositivos conocidos como relojes atómicos. El principal problema reside en que la frecuencia de salida de dicho dispositivo difiere de la frecuencia

(8) Sección que acogería en su seno las tareas del Servicio de Hora, dependiente hasta entonces de la Sección de Astronomía.

atómica que trata de materializar, al estar esta última contaminada por ruidos y desplazada en frecuencia respecto de su valor nominal, debido a perturbaciones tanto de naturaleza técnica como fundamental.

En la práctica, solo unas pocas y muy bien conocidas transiciones atómicas presentan idoneidad para la realización de patrones de frecuencia. Estas deben tener largos tiempos de vida, baja sensibilidad a campos externos (eléctrico y magnético) y una estructura compatible con los métodos disponibles para la manipulación y detección de átomos. Dado el nivel de conocimiento y la tecnología disponible en 1967, el patrón de frecuencia basado en la actual transición hiperfina del átomo de Cs —metal alcalino con un único electrón en su última capa— era una de las mejores opciones.

### Evolución de patrones de frecuencia de alta exactitud

La primera generación de patrones primarios de frecuencia, basados en haz térmico de  $^{133}\text{Cs}$ , en el que los átomos son lanzados desde un horno, fue mejorada en 1980 con el progreso de las técnicas de enfriamiento láser. En esta segunda generación de relojes, conocidos como fuentes atómicas de cesio (FA Cs), los átomos son previamente confinados (enfriados) mediante láseres, y la señal emitida tras su excitación está sujeta a menores errores al verse apenas afectada por el propio movimiento de estos. En la actualidad, estos relojes de tipo fuente

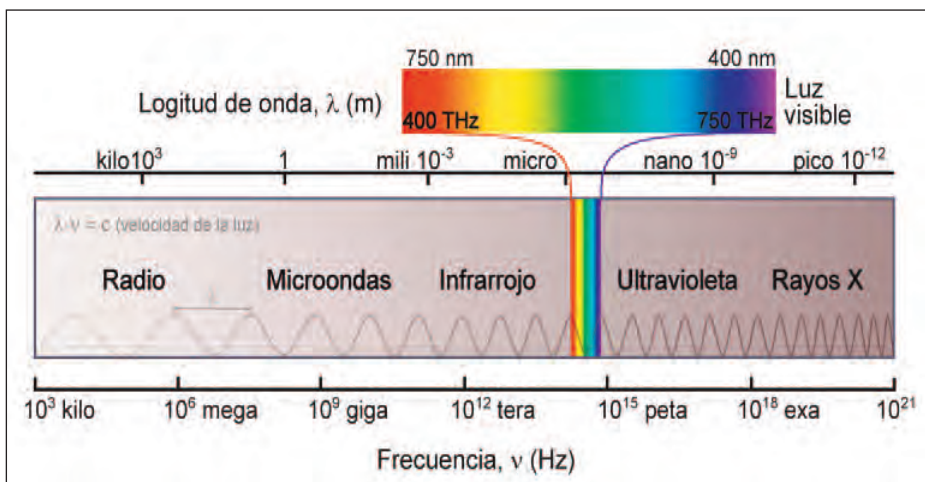


Figura 4. Esquema del espectro electromagnético. Como se aprecia, este abarca desde las ondas radio con longitudes de onda de kilómetros a los rayos gamma (a continuación de los rayos X), con longitudes del orden del picómetro (tamaño típico de los átomos). La región visible engloba la pequeña parte del espectro con longitudes de onda de entre 400 y 700 nanómetros.

son los encargados de la realización práctica del segundo SI y de dotar de exactitud a la escala TAI/UTC.

La búsqueda de incertidumbres cada vez más bajas fue de la mano de la exploración de sistemas atómicos que interaccionasen con los campos electromagnéticos. De esta manera comenzó la exploración de transiciones ópticas (entre diez mil y cien mil veces superiores a las de microondas, como se observa en la figura 4), en donde el láser, en sustitución del cuarzo, se convertiría en el nuevo oscilador interno de interrogación. Surge así una nueva generación de relojes atómicos, los ópticos.

Actualmente, tanto iones como átomos neutros están siendo estudiados, y ambos han demostrado incertidumbres relativas en el orden de  $10^{-18}$ . Estos niveles de exactitud implican variaciones de un segundo en  $10^{18}$  segundos o, lo

que es lo mismo, de un segundo en aproximadamente 30.000 millones de años (9), por lo que requieren de un exquisito control de los efectos sistemáticos por los que puedan verse afectados (radiación por cuerpo negro, campos eléctricos y magnéticos externos, gravedad, etc.). Pero si hay una tecnología que ha resultado vital en el desarrollo de los relojes ópticos, esta ha sido la del peine de frecuencias ópticas (10), que permite la medición y comparación de diferentes y distantes frecuencias de manera simultánea. Como se muestra en la figura 5, esta «caja de engranajes» permite dividir las altas oscilaciones de los relojes ópticos en frecuencias más bajas, de manera que puedan ser «contadas» por la electrónica, como si de un reloj convencional de cuarzo se tratase. Y a su vez pueden ser

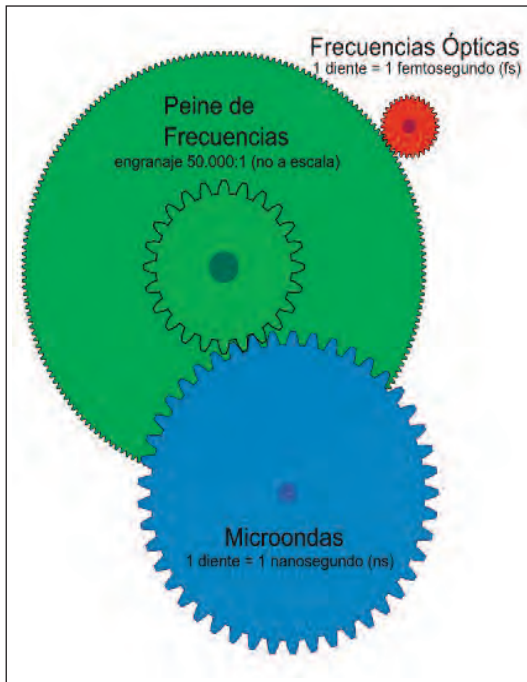


Figura 5. Símil mecánico del peine de frecuencias ópticas.

(9) 30.000 millones de años = 10,96 billones de días = 0,95 trillones de segundos  $\approx 10^{18}$  segundos, lo que representa más del doble de la edad del Universo.

(10) Desarrollado por los físicos John Hall y Theodor Hänsch a finales del siglo xx, por lo que fueron distinguidos con el Premio Nobel de Física de 2005.



ligadas a las de microondas (donde la actual definición del segundo SI reside), conectándolas con toda la infraestructura y los métodos ya existentes.

Los enlaces de fibra óptica han supuesto el complemento perfecto para estos patrones. La inyección de láseres ultraestables permite la comparación, a escala continental, de distintos patrones ópticos respecto de la misma frecuencia portadora. Estos han demostrado una exactitud en la transferencia de hasta tres órdenes de magnitud superior a los convencionales métodos de comparación por satélite. Esta frecuencia, además, es diseminada para su uso en otros experimentos más allá de la metrología de TF, como son el análisis de efectos relativistas en el marco de la física teórica, el estudio de la rotación de la Tierra o incluso la detección de terremotos. Resulta, no obstante, curioso que a partir de sistemas aparentemente entrópicos (desordenados a nivel molecular) puede surgir la medida más precisa efectuada sobre la Tierra.

En la figura 6, por ejemplo, se muestra en el centro cómo una pequeña nube (diámetro dos milímetros) de átomos de estroncio (Sr) es inmovilizada por la combinación de fuerzas ópticas y magnéticas, conocida como trampa magneto-óptica. Estos átomos a continuación son confinados en una profunda red óptica — formada por el conjunto de lentes y espejos visibles en la figura 6— y finalmente un láser espectralmente puro interroga la estrecha transición interna que acaba proporcionando la frecuencia de referencia.

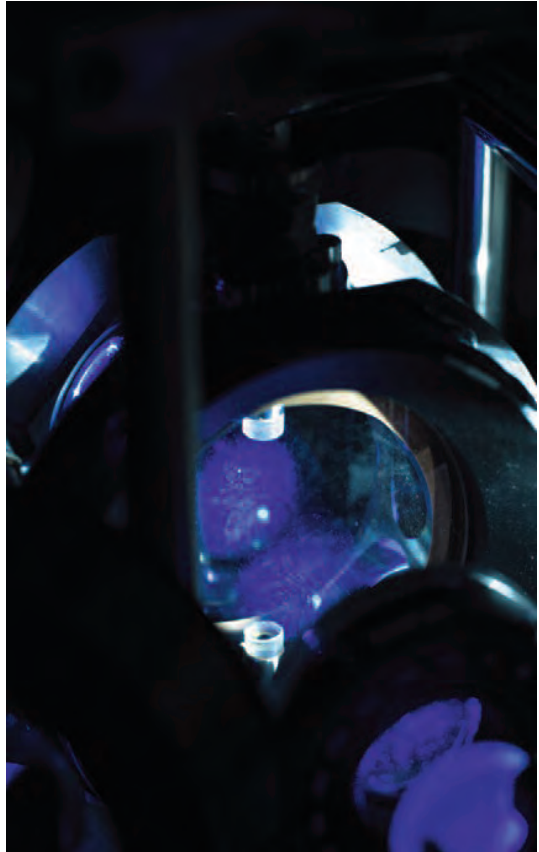


Figura 6. Núcleo del reloj de red óptica de Sr (B) del LNE-SYRTE, Observatoire de Paris. (Derechos de autor: LNE-SYRTE/Rodolphe Le Targat).

## Hacia una redefinición del segundo del Sistema Internacional

En los últimos diez años, los relojes ópticos han sobrepasado a sus homólogos en el rango de las microondas, donde descansa la actual definición, lo que ha incentivado el interés por una redefinición del segundo SI a favor de los primeros. Desde 2004, el CIPM ha adoptado nuevas representaciones secundarias del segundo, basadas en distintos tipos de frecuencias y de átomos, postulándose como serias candidatas a ostentar la nueva definición. No obstante lo anterior, en primer lugar deberán cumplir una serie requisitos, como por ejemplo mostrar una incertidumbre de una parte en  $10^{18}$ , a partir de las medidas entre tres relojes, o contribuir regularmente al TAI, algo de lo que adolecen estos sistemas; es decir, mantener un funcionamiento ininterrumpido durante largos períodos de tiempo, característica básica de cualquier reloj.

Esta futura redefinición es clave no solo en la mejora de tecnologías actuales, como los sistemas de posicionamiento GNSS (GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO, etc.), las redes eléctricas inteligentes o la tecnología 5G, entre otras, sino que lo será aún más en aplicaciones que están por descubrir y que vendrán de la mano de infraestructuras ópticas.

Consciente de ello, la Armada, a través del ROA, ha iniciado un ambicioso proyecto para la construcción e implementación de un reloj de red óptica de estroncio (CIROEs), que mejorará sin ninguna duda nuestra capacidad de medida y posicionará a España entre el selecto grupo de países del mundo con dicha tecnología.

## Conclusiones

La definición de una unidad física cobra sentido práctico por primera vez cuando se realiza físicamente. Esta depende significativamente del nivel de disponibilidad científica y tecnológica y debe ser reexaminada según la necesidad. La evolución de los relojes ópticos en los últimos 20 años sugiere una nueva revisión que permita futuros avances en la metrología óptica y cuántica cuando estas dejen de estar limitadas por la actual definición.

El CIPM supervisa los progresos actuales en vista a esa posible redefinición que, sin duda, tendrá lugar en los años venideros. Todavía queda trabajo por delante para cumplir con los exigentes requisitos impuestos, en los que el ROA, como laboratorio primario de metrología de TF en España, ya se ha puesto manos a la obra y espera poder contribuir a partir de 2023.